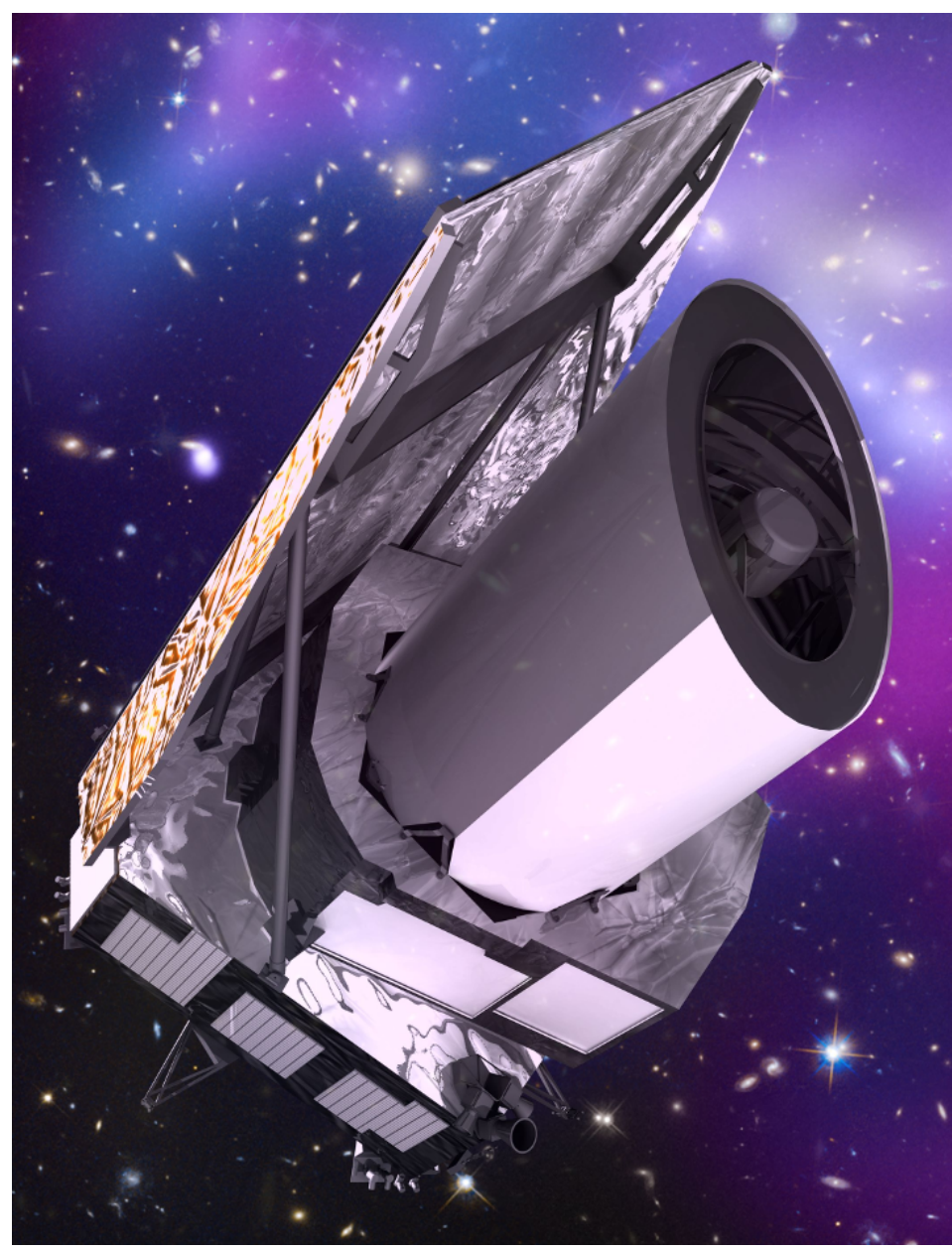


Introduction

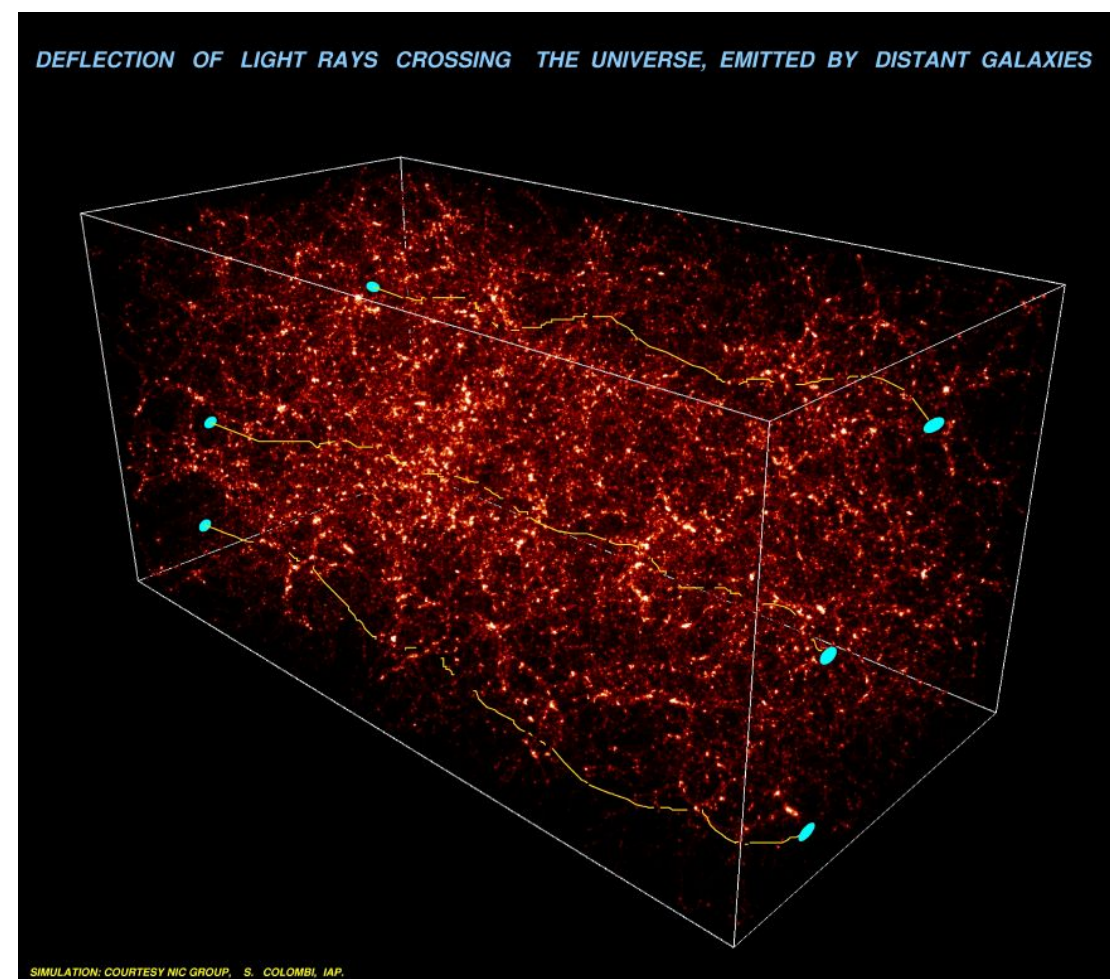
- La mission spatiale **Euclid** de l'ESA vise à répondre aux questions fondamentales sur la nature de l'énergie sombre.
- Un des moyens utilisés par Euclid pour sonder l'Univers est le **cisaillement gravitationnel**, i.e. la déformation de l'image des galaxies par la présence de masse sur la ligne de visée.
- Euclid va mesurer la forme et la distance de plus d'un **milliard de galaxies** sur un champ de 15 000 deg².
- Une des applications de ces données est la **cartographie 3D de la matière noire** qui n'est décelable qu'au travers de ses effets gravitationnels.
- Nous proposons une **nouvelle méthode** de reconstruction 3D, **GLIMPSE** (Leonard et al., 2014), basée sur la régularisation de problèmes inverses sous **contrainte de parcimonie**.
- Nous montrons que les **performances de GLIMPSE dépassent largement celles des méthodes précédentes** et permettent pour la première fois de mesurer distance et masse des halos de matière noire à partir des cartes 3D reconstruites.



Vue d'artiste du Satellite Euclid © ESA

Le cisaillement gravitationnel 3D

- Le cisaillement gravitationnel est causé par la déflexion gravitationnelle des rayons lumineux passant à proximité des structures à grandes échelles de l'Univers.



L'image d'une galaxie d'arrière plan nous apparaît légèrement déformée et subie un **cisaillement** γ qui s'ajoute à son ellipticité intrinsèque ϵ^S : $\epsilon = \epsilon^S + \gamma$

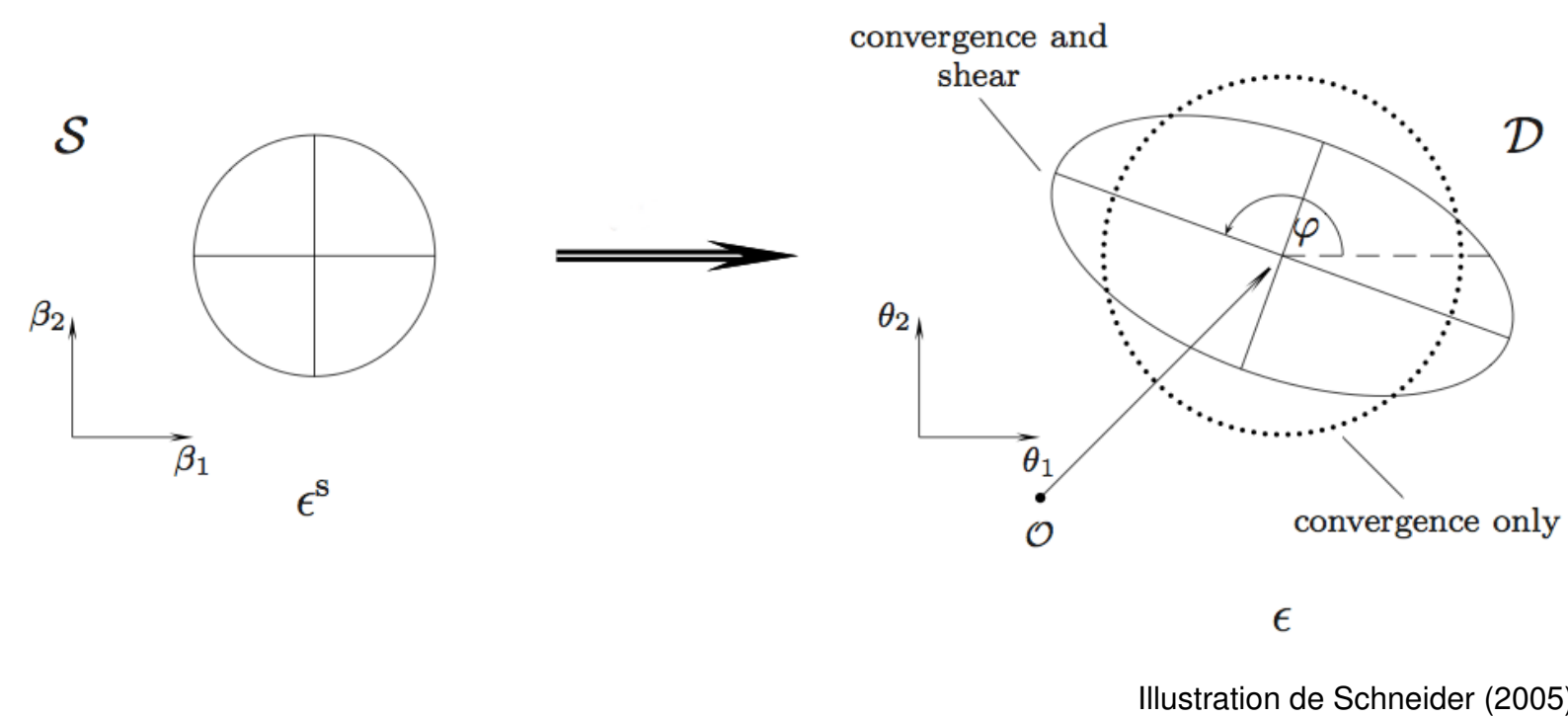


Illustration de Schneider (2005)

- Le cisaillement $\gamma(\theta, \mathbf{z})$ est estimé à partir des galaxies observées et peut être relié à la densité de matière noire $\delta(\theta, \mathbf{z})$ par la relation linéaire:

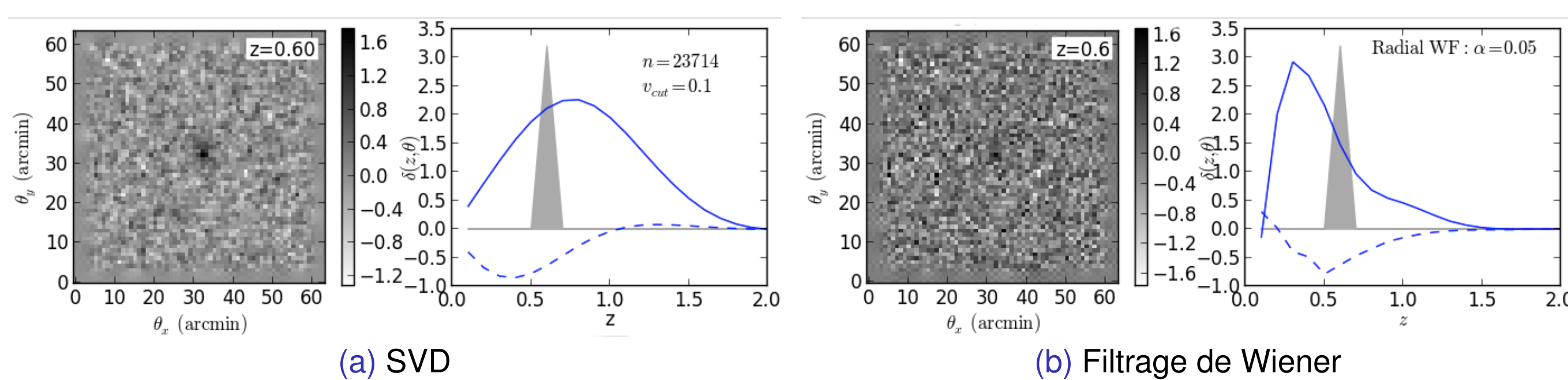
$$\gamma(\theta, \mathbf{z}) = \mathbf{R}\delta(\theta, \mathbf{z}) + \mathbf{n}_\gamma(\theta, \mathbf{z})$$

où \mathbf{R} est l'opérateur de cisaillement 3D encodant la physique de l'effet de lentille gravitationnelle et \mathbf{n}_γ est le bruit sur l'estimée de γ , que l'on suppose Gaussien de matrice de covariance Σ .

Un problème inverse mal posé difficile à résoudre

- L'opérateur \mathbf{R} n'est pas inversible. La solution au problème n'est pas unique.
- Les mesures de cisaillement sont **largement dominées par le bruit**.
- \Rightarrow Une **régularisation robuste est nécessaire** pour reconstruire δ à partir de γ .

- Les méthodes d'**inversion linéaires existantes** (Filtrage de Wiener (Simon et al., 2009), SVD (VanderPlas et al., 2011)) ne **reconstruisent pas la densité**, uniquement des cartes de SNR et souffrent d'un **étalement des structures en redshift**, ce qui limite fortement leurs applications.



(a) SVD

(b) Filtrage de Wiener

Figure : Reconstructions linéaires d'un halo de matière noire de masse $10^{15} h^{-1} M_\odot$ à un redshift de $z = 0.55$, dans les conditions d'Euclid.

GLIMPSE: Reconstruction parcimonieuse de la densité 3D de matière noire

- La régularisation sous contrainte de parcimonie permet de résoudre des problèmes inverses mal posés de manière robuste en utilisant comme information a priori que le signal recherché possède une **représentation parcimonieuse dans un dictionnaire adapté**, i.e. un faible nombre de coefficients non nuls suffisent à obtenir une très bonne approximation du signal.
- Nous construisons un dictionnaire multi-échelle Φ adapté à la densité δ en combinant un Dirac selon la ligne de visée avec des **ondelettes isotropes non décimées** dans le plan transverse.

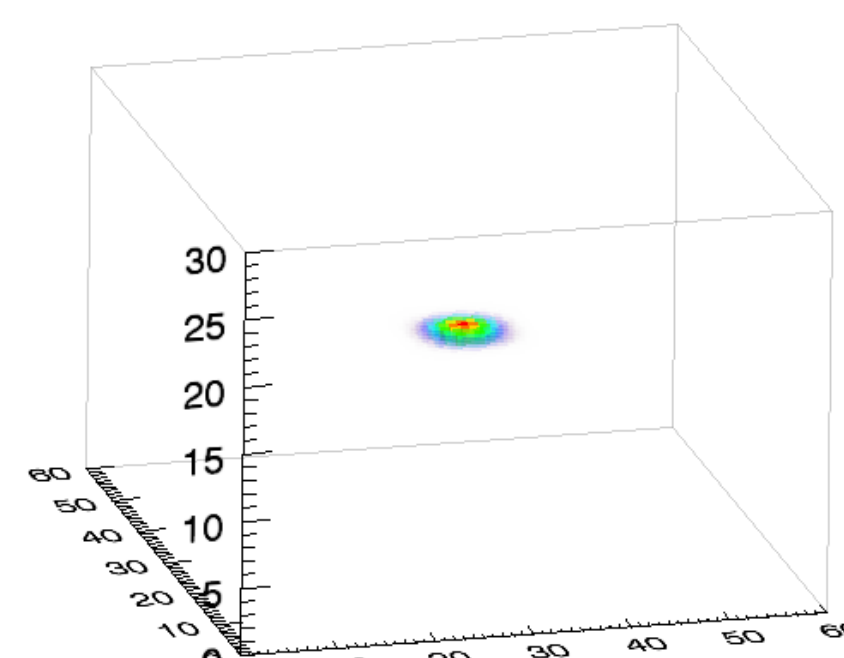


Figure : Représentation d'un unique atome du dictionnaire Φ

- La densité de matière noire δ est reconstruite en résolvant le **problème d'optimisation** suivant:

$$\min_{\alpha} \frac{1}{2} \underbrace{\|\gamma - \mathbf{R}\Phi\alpha\|_2^2}_{\text{attache aux données}} + \lambda \underbrace{\|\alpha\|_1}_{\text{contrainte de parcimonie}}$$

où α représente les coefficients du signal reconstruit $\tilde{\delta}$ dans le dictionnaire Φ : $\tilde{\delta} = \Phi\alpha$ et λ est un paramètre régulant la contrainte de parcimonie.

- GLIMPSE résout ce problème d'optimisation par *forward-backward splitting* en adaptant l'algorithme FISTA (Beck and Teboulle, 2009). L'itération principale de l'algorithme est la suivante:

$$\alpha_{n+1} = \mathbf{ST}_{k\sigma}(\alpha_n + \mu\Phi^T\mathbf{R}^T\Sigma^{-1}[\gamma - \mathbf{R}\Phi\alpha_n])$$

où les α_n sont les coefficients de l'estimée courante de δ et $\mathbf{ST}_{k\sigma}$ l'opérateur de seuillage doux qui favorise une solution parcimonieuse. Le seuil $\lambda = k\sigma$ **régule la contrainte de parcimonie de manière adaptative** par rapport au niveau de bruit σ .

Comparaison aux méthodes linéaires

- Nous comparons ici GLIMPSE aux méthodes linéaires sur la reconstruction d'un halo de masse $10^{15} h^{-1} M_\odot$ à un redshift de $z = 0.55$, dans les conditions d'Euclid.

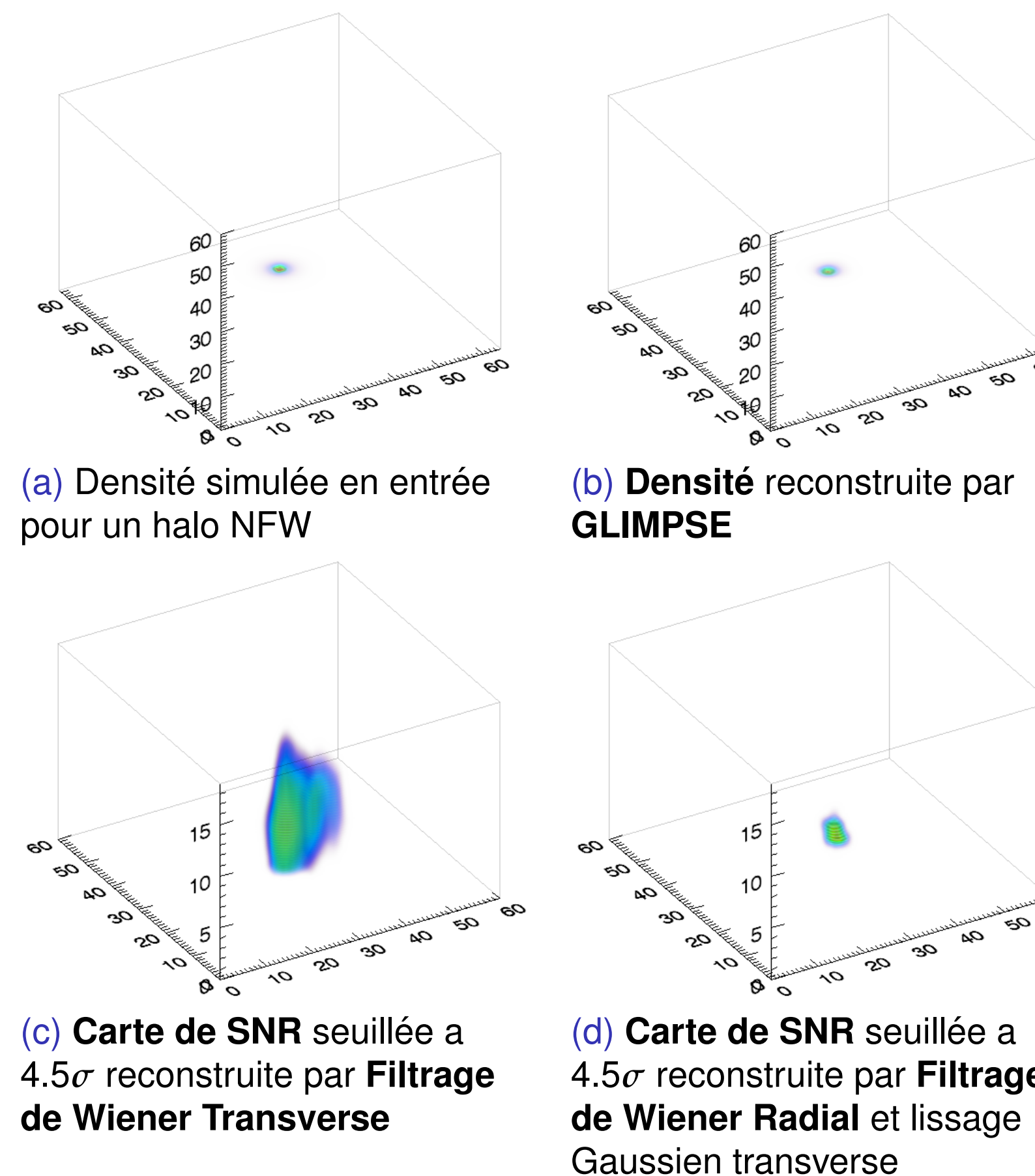


Figure : Reconstruction en utilisant GLIMPSE et Filtrage de Wiener.

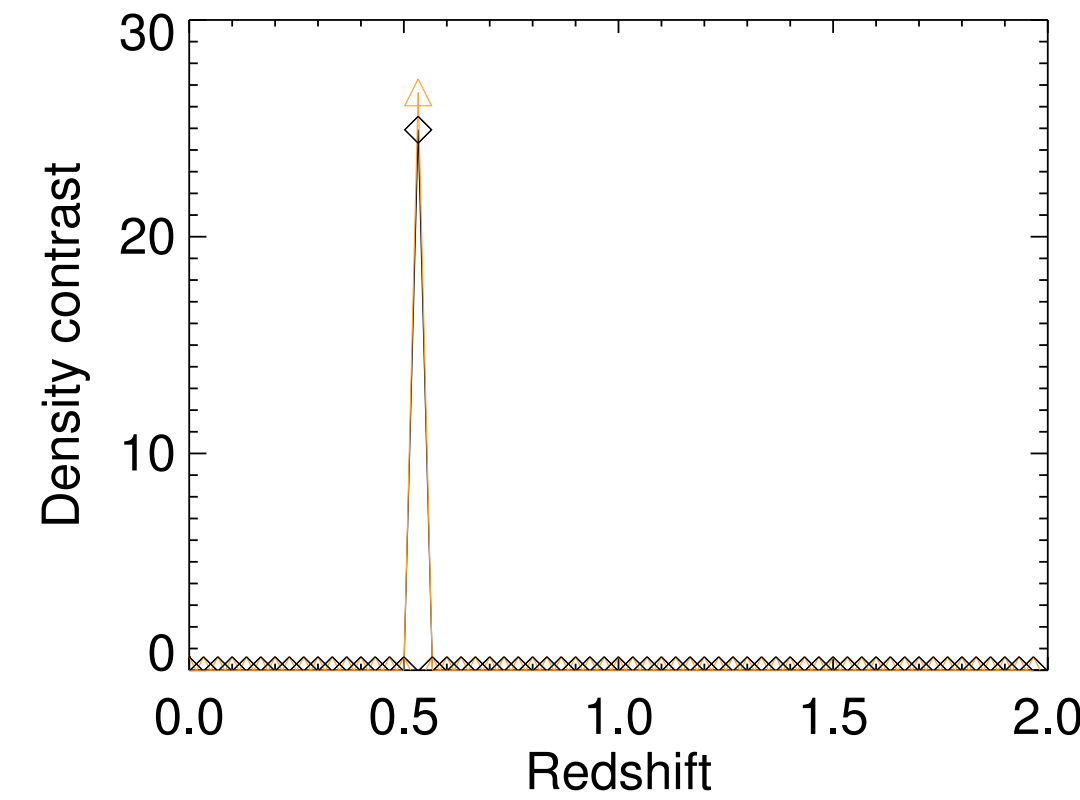


Figure : Ligne de visée centrale de la densité simulée (noire) et de la densité reconstruite par GLIMPSE (orange)

Points-clés de GLIMPSE

- Amélioration spectaculaire de la résolution.
- Reconstruction de la **densité**.
- Pas de biais en redshift.
- Pas de biais en amplitude.

Détection et caractérisation d'amas de galaxies avec GLIMPSE

- Une **nouvelle application** permise par GLIMPSE est la détection d'amas de galaxies à partir des cartes 3D.
- Nous simulons le signal de cisaillement produit par des amas de différentes masses et redshifts observés dans les conditions d'Euclid.
- Pour chaque amas, une carte de densité 3D est reconstruite avec GLIMPSE, à partir de laquelle le redshift et la masse de l'amas est mesuré.
- Les statistiques sont calculées sur 1000 réalisations de bruit indépendantes.

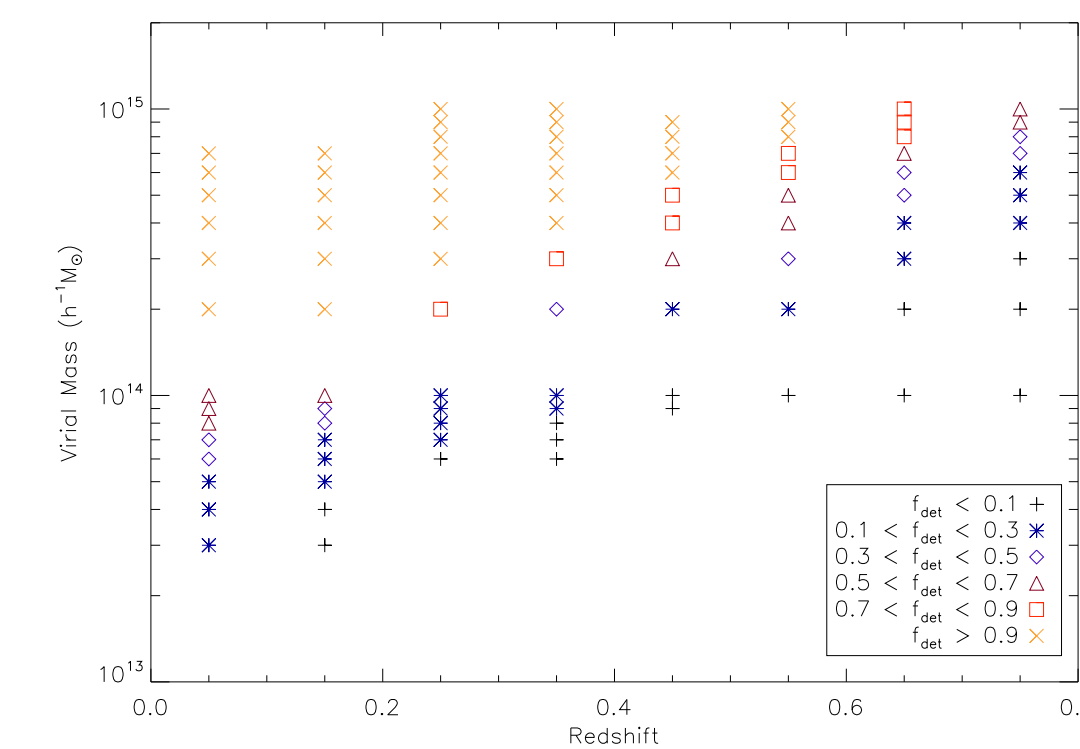


Figure : Distribution en masse et redshift des amas simulés.

Compte-rendu des résultats

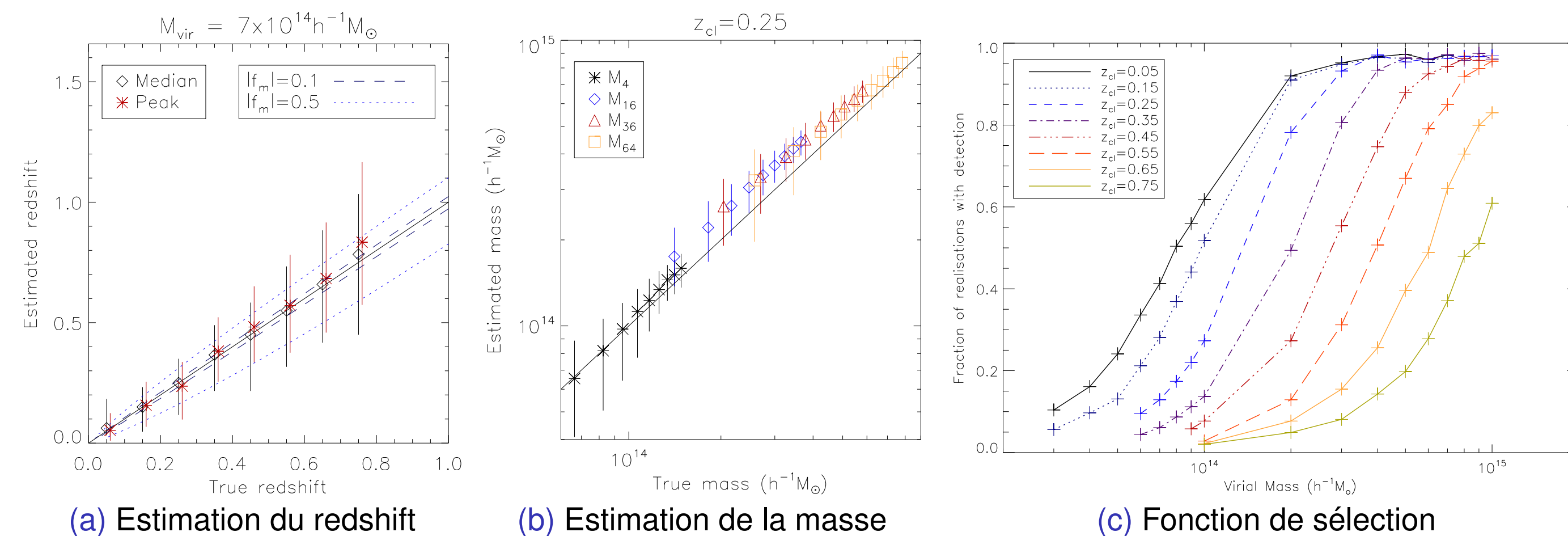


Figure : (a) Redshift estimé en fonction du redshift réel pour un amas de masse $7.10^{14} h^{-1} M_\odot$. (b) Masse estimée en fonction de la masse réelle pour un amas situé à $z = 0.25$ pour quatre proxies de masse différents. (c) Fonction de sélection indiquant le pourcentage d'amas détectés en fonction de la masse et du redshift.

Conclusion et perspectives futures

- Contrairement aux méthodes de cartographie précédentes GLIMPSE permet de **reconstruire la densité de matière noire**, et ce avec une résolution sans précédent.
- La qualité des reconstructions obtenues permet pour la première fois de **détecter et de contraindre en masse et redshift des amas de galaxies** de masses inférieures à $10^{15} h^{-1} M_\odot$ jusqu'à $z = 0.75$ à partir du cisaillement gravitationnel.
- Les travaux futurs incluent la caractérisation de GLIMPSE sur des simulations à N-corps réalistes dans le cadre de la mission Euclid en vu d'une intégration au pipeline de traitement.
- A terme, les cartes de matière noire reconstruites par cisaillement gravitationnel pourraient compléter la détection des amas en optique et contribuer à contraindre la **fonction de masse des halos**, grandeur extrêmement sensible aux paramètres cosmologiques.

Références

- Beck, A. and Teboulle, M. (2009). A fast iterative shrinkage-thresholding algorithm for linear inverse problems. *SIAM J. Img. Sci.*, 2(1).
- Leonard, A., Lanusse, F., and Starck, J.-L. (2014). **GLIMPSE: accurate 3D weak lensing reconstructions using sparsity**. *MNRAS*, 440:1281–1294.
- Simon, P., Taylor, A. N., and Hartlap, J. (2009). Unfolding the matter distribution using three-dimensional weak gravitational lensing. *MNRAS*, 399:48–68.
- VanderPlas, J. T., Connolly, A. J., Jain, B., and Jarvis, M. (2011). Three-dimensional Reconstruction of the Density Field: An SVD Approach to Weak-lensing Tomography. *ApJ*, 727:118.

Remerciements

Ces travaux ont été supportés par la bourse European Research Council grant SparseAstro (ERC-228261).